

## Introduction à l'Ecole Joliot-Curie 1996

Jean-Pierre DUFOUR

CENBG, Le Haut Vigneau, BP 120  
F-33175 Gradignan cedex

Le fait que la recherche fondamentale féconde à terme l'activité de production industrielle est une réalité, maintenant largement admise, que le sujet de cette école Joliot-Curie, l'énergie nucléaire, illustre de façon exemplaire.

Des découvertes fondamentales, dont celle de la radioactivité il y a cent ans, à la construction des premiers réacteurs utilisés commercialement il s'est passé plusieurs dizaines d'années pendant lesquelles l'implication de la recherche est passée progressivement de la percée conceptuelle à une exploration plus systématique des propriétés nucléaires puis à la métrologie. Cette première étape de recherche où la curiosité naturelle des scientifiques a "par hasard" ouvert la voie de l'énergie nucléaire s'est terminée dans les années 1970. Il a pu sembler alors que les seuls progrès dans le domaine seraient désormais d'ordre essentiellement technologiques.

Puis au cours des années 90, presque comme une surprise, on a pu voir le retour au premier plan de la recherche fondamentale à la suite d'une demande sociale concernant les déchets et la sécurité de l'industrie nucléaire. Dans cette réactualisation, la nouveauté est en grande partie la motivation de la recherche qui ne répond plus uniquement à des préoccupations d'ordre scientifique mais aussi aux besoins définis par la société. En France par exemple, la loi de Décembre 1991, (donnée ici en annexe) définit une période de quinze ans pendant laquelle la recherche publique doit apporter de nouveaux éléments de réponse concernant les possibilités de stockage, réversible ou non, ou de transmutation de déchets radioactifs. Ailleurs dans le monde des questions semblables et d'autres comme l'élimination des stocks de plutonium militaire ou l'amélioration de la sécurité des installations nucléaires sont également à l'ordre du jour.

Les recherches en cours peuvent être classées, au moins au premier ordre, selon trois thèmes principaux :

- Les améliorations du cycle actuel. Il s'agit notamment des études sur les recyclages de combustibles pour brûler les transuraniens en réacteur et parallèlement des travaux sur le conditionnement et le stockage géologique des déchets nucléaires ultimes.
- Les réacteurs dits "hybrides". En utilisant un accélérateur de particules (typiquement des protons d'énergie supérieure à 500 MeV) il est possible par réactions nucléaires dites de spallation de créer des neutrons qui sont injectés dans un réacteur sous-critique. Les buts poursuivis sont multiples : l'incinération des transuraniens, la transmutation des produits de fission et une meilleure sécurité par diminution du risque de fusion du coeur.

- Le cycle au Thorium dont la mise en oeuvre est facilitée dans un système hybride par l'apport supplémentaire des neutrons de spallation. Les avantages mis en avant sont essentiellement une production très faible des déchets nucléaires appelés actinides mineurs, l'importance des réserves mondiales de Thorium, avantages qui viennent s'ajouter à ceux déjà mentionnés pour tout système hybride.

Le but de cette introduction à l'école Joliot-Curie est essentiellement de fournir un repérage général. Celui-ci doit aller au-delà de l'inventaire à grands traits fait ci-dessus et inclure la dimension temporelle, tant il est vrai que sur des sujets comme la sécurité, la gestion des déchets ou les effets des faibles radioactivités, les connaissances et leur perception dans la société ont fortement évolué lors des cinquante dernières années. Dans cette perspective historique le tableau 1 récapitule les dates marquantes de l'industrie nucléaire : de la découverte initiale de la fission en 1939 aux années 1991-93 qui marquent l'essor des trois thèmes mentionnés précédemment.

Tableau 1 : Perspective historique sommaire par dates marquantes

1939	-	Découverte de la fission
1942	-	Première pile Chicago
1945	-	<b>France</b> : Création du CEA
1948	-	<b>France</b> ZOE (Zéro énergie, Oxyde d'Uranium, Eau lourde)
1951	-	EBR1 (IDAHO) 300 KW $\Rightarrow$ électricité
1954	-	AEC "Five reactor Demonstration Program"
1956	-	<b>France</b> : G1 - Marcoule : Graphite-Gaz
1963	-	Percée économique (Jersey-Central Power & Light)
1969	-	<b>France</b> : EDF opte pour la filière à eau pressurisée avec la perspective d'un parc de surgénérateurs
1972	-	Convention de Londres : interdiction du rejet de déchets en mer (70 pays)
1977	-	<b>France</b> : Mise en marche de Fessenheim
1979	-	Accident de Three Mile Island (TMI) - USA
1979	-	<b>France</b> : Création de l'ANDRA (devient un établissement public en 1992)
1986	-	Accident de Tchernobyl
1991	-	<b>France</b> : Loi relative aux recherches sur les déchets
1992	-	Convention de Paris : zéro déchet en mer (15 pays d'Europe)
1993	-	<b>France</b> : Inventaire de l'ANDRA Projet EPR : réacteur plus sûr pour le futur

Il est important de réaliser que peu après la fin de la deuxième guerre mondiale, les connaissances fondamentales étaient suffisamment avancées pour que la difficulté soit bien plus d'avoir à trier parmi une profusion de solutions que d'en faire progresser une en particulier. La notion de filière s'est ainsi dégagée très rapidement : un réacteur doit comporter un combustible nucléaire, un modérateur et un fluide caloporteur. Pour chacune des trois composantes d'une filière les quelques choix possibles ont été identifiés très tôt. Le combustible peut être de l'uranium naturel ou enrichi ou les isotopes fissiles,  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{233}\text{Th}$  générés par capture de neutrons sur  $^{238}\text{U}$  ou  $^{232}\text{Th}$  ce qu'on appelle la surgénération. Le premier réacteur ayant permis de produire de l'électricité (EBR1 en 1951) était d'ailleurs de ce type. Le modérateur est destiné à ralentir les neutrons issus de la fission (1 à 2 MeV). Ce processus est surtout intéressant avec  $^{235}\text{U}$  qui a une section efficace de fission qui croît pour les faibles énergies de neutrons ( $< 1$  eV). Ce modérateur doit être peu absorbant pour les neutrons et léger pour ralentir efficacement les neutrons par collisions successives. Les matériaux possibles sont  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$  (eau lourde), Be, BeO et C (graphite). L'eau lourde en particulier absorbe très peu les neutrons.

Pour constituer le fluide caloporteur, qui doit également être peu absorbant pour les neutrons, on retrouve les éléments légers constituant des gaz ou des liquides ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , air, He) ou des éléments plus lourds à température assez élevée pour les rendre liquides (Na, Na-K, Pb, Bi).

Les solutions effectivement testées n'ont pas été aussi nombreuses que les possibilités de combinaisons mathématiques, mais à travers le monde les années 50 ont vu un foisonnement d'explorations différentes. On peut citer en particulier le programme lancé en 1954 aux Etats-Unis sur cinq types de réacteurs différents (Tableau 2). En France, la première pile, ZOE (pour Zéro énergie, Oxyde d'uranium, Eau lourde) a fonctionné en 1948 et fut suivie des réacteurs de Marcoule (G1, 2, 3 à partir de 1956) qui appartenaient à la filière graphite-gaz. Les principales filières utilisées dans les réacteurs sont données dans le tableau 3.

Tableau 2 : Programme des cinq réacteurs  
de démonstration aux USA (1954)

Réacteur	Contractant	Lieu
Experimental Boiling Water Reactor (EBWR)	Argonne National Laboratory	Arco, ID
Experimental Breeder Reactor No. 2 (EBR-2)	Argonne National Laboratory	Argonne, IL
Homogeneous Reactor Experiment No. 2 (HRE-2)	Oak Ridge National Laboratory	Oak Ridge, TN
Pressurized Water Reactor (PWR)	Duquesne Light Co.	Shippingport, PA
Sodium Reactor Experiment (SRE)	Atomics International	Santa Susana, CA

Tableau 3 : Principales filières utilisées  
dans les réacteurs nucléaires

Filière	Combustible	Modérateur	Fluide caloporteur
Graphite-Gaz (UNGG)	U naturel	Graphite	Gaz carbonique ou hélium
Eau lourde	U naturel ou enrichi	Eau lourde	Eau lourde Eau ordinaire Liquide organique
Eau sous pression (REP)	U enrichi	Eau ordinaire	Eau ordinaire
Surgénérateur	U enrichi Plutonium	Néant	Sodium

La véritable percée économique eut lieu au cours des années 60 aux Etats-Unis et consacra la filière dite à eau pressurisée (REP en français, PWR en anglais). En 1969, sur décision prise au plus haut niveau de l'Etat, la France fit le choix d'utiliser la même filière et abandonna celle au graphite-gaz. Dans le même temps l'enthousiasme pour cette nouvelle énergie fut tel que l'utilisation de l'isotope  $^{235}\text{U}$  peu abondant (0,7% de l'uranium naturel) apparut essentiellement comme une première étape vers les filières surgénératrices qui consomment l'isotope  $^{238}\text{U}$ . Dans ce scénario la production de  $^{239}\text{Pu}$  à partir de  $^{238}\text{U}$  peut à terme se faire sans plus avoir recours à  $^{235}\text{U}$ . En France les décisions de construire les réacteurs Phénix et Superphénix ainsi que l'usine de séparation du Pu à partir du combustible usé ont découlé de cette perspective.

Les années 1970 ont vu successivement l'énergie nucléaire supplanter d'autres voies de production d'électricité dans un contexte de tension internationale sur le pétrole puis subir un choc majeur en 1979 avec l'accident de Three Mile Island (TMI). La fusion du coeur de ce réacteur ne causa que des dégâts matériels mais marqua très fortement l'opinion publique américaine qui se défia dès lors beaucoup plus fortement des estimations officielles sur les risques, comme le fameux rapport Rasmussen. Par ailleurs de nouvelles contraintes juridiques consécutives à cet accident contribuèrent à renchérir le coût du nucléaire aux USA.

Avec la mise en oeuvre du nucléaire à grande échelle il était naturel que la question des déchets nucléaires se pose progressivement de façon plus significative. La convention de Londres signée en 1972 permit d'interdire le rejet en mer des déchets nucléaires solides les plus actifs. En France l'Agence Nationale pour les Déchets Radioactifs (ANDRA) fut créée en 1979 comme une structure interne au CEA, puis administrativement détachée en 1992 pour devenir un établissement public.

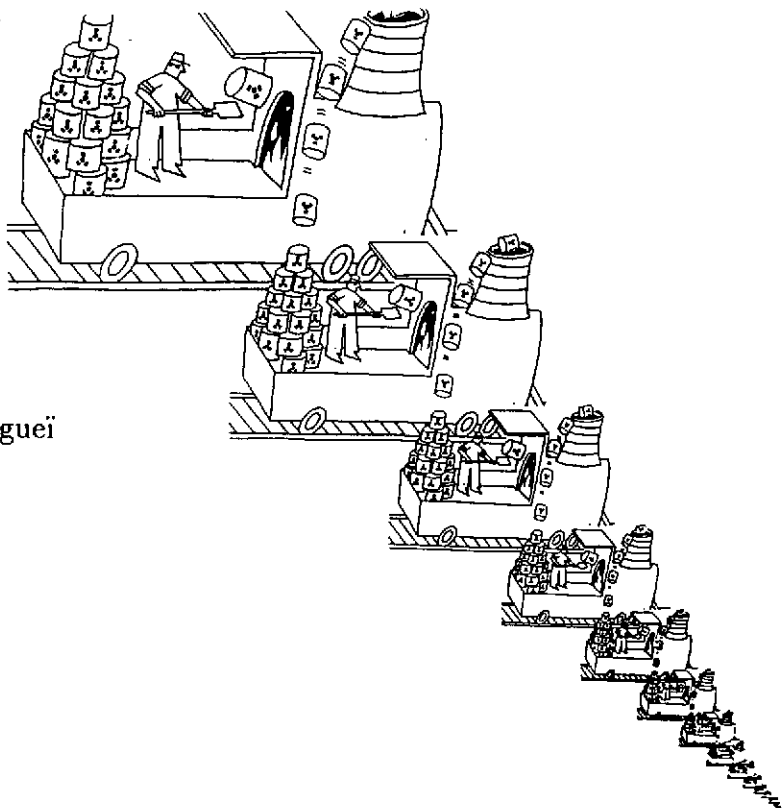
Par ailleurs le climat général sur le marché de l'énergie fut beaucoup moins favorable au nucléaire à partir des années 80. D'une part la consommation d'énergie des pays développés

nucléaire à partir des années 80. D'une part la consommation d'énergie des pays développés avait cessé de croître et d'autre part le prix du pétrole, après l'envolée des années 70, revint à des cours très bas.

C'est dans ce contexte que survint l'accident de Tchernobyl en 1986. Concrétisant l'accident maximum prévisible, il eut en Europe sur le grand public un effet globalement semblable à celui de TMI aux Etats-Unis. En France, paradoxalement, les débats concernant les conséquences des pollutions radioactives de Tchernobyl amenèrent l'opinion publique à s'inquiéter davantage des déchets nucléaires que d'un éventuel accident. On peut relier ce fait à un changement de stratégie de communication de l'exploitant (EDF) et des autorités de sûreté et de contrôle en faveur de la transparence dans l'information. Citons par exemple l'accès aux mesures des balises radiologiques par le minitel 3614 Magnuc et la création des Commissions Locales d'Information (CLI) autour de chaque centrale.

Après environ vingt ans de vie économique la situation de l'énergie nucléaire est devenue très variable selon les pays. Au-delà de la variété des filières, l'attitude sur le traitement du combustible irradié (stockage tel quel comme aux Etats-Unis ou séparation des produits de fission, du plutonium et des actinides mineurs comme en France) et l'ancrage d'images positives ou négatives dans le public ont abouti à un paysage mondial extrêmement hétérogène.

Dans ce panorama, la France se retrouve, par son choix stratégique d'explorer la voie surgénératrice, en situation d'être probablement le pays le plus à même d'explorer les différentes alternatives dans la gestion des déchets nucléaires. C'est ainsi que l'on peut comprendre les décisions successives des années 1991-1993 : Loi sur les recherches de 1991 (Annexe 1), Convention de Paris signée en 1992 par 15 pays d'Europe sur l'interdiction totale de l'immersion de déchets (solides) en mer, conversion de Superphénix en outil de recherche sur l'élimination des déchets (Annexe 2, article du Monde 30/12/92) et l'inventaire national des déchets radioactifs réalisé par l'ANDRA en 1993.



Détournement du dessin de Sergueï  
(voir article du Monde  
en Annexe 2)

Dans la même période le souci d'accroître la sécurité des réacteurs est également présent avec le projet EPR (European Pressurized water Reactor) mené par la France et l'Allemagne.

Cette petite perspective historique s'arrête au moment où Charles Bowman aux Etats-Unis et Carlo Rubbia en Europe proposent d'utiliser les accélérateurs de particules comme compléments versatiles de réacteurs du futur pouvant au choix : produire de l'énergie avec beaucoup moins de déchets (cycle au Thorium), brûler du plutonium et les actinides mineurs, transmuter des produits de fission. Les copies des premières pages des brevets pris par ces deux scientifiques sont donnés dans l'annexe 4.

La présentation concentrée des événements successifs qui ont marqué l'évolution de l'énergie nucléaire montre bien que les "solutions" qui seront finalement retenues tiendront à l'intérieur d'un triangle formé par les limites économiques, les limites sociales et les limites de la physique. Sans oublier donc ces contraintes toujours sous-jacentes, c'est bien sûr à l'exploration des possibilités d'innovations scientifiques que cette école est consacrée.

Pour clore cette introduction voici quelques notions importantes souvent utilisées dans les cours de l'école.

- **Incinération de déchets nucléaires** : ce terme recouvre l'élimination des éléments transuraniens ( $Z > 92$ ) en les faisant fissionner. Certains isotopes ayant une faible section efficace de fission, il est nécessaire de leur faire capturer un neutron pour pouvoir les éliminer ensuite par fission. L'incinération est un processus qui globalement fournit de l'énergie.
- **Transmutation** : bien que désignant tout processus de transformation d'un élément chimique en un autre, ce terme sera dans le cadre des déchets souvent utilisé de manière restrictive pour l'élimination des produits de fission radiotoxiques. Le moyen le plus économique pour transmuter est la séquence capture de neutron puis décroissance bêta du noyau de masse  $A+1$ . La transmutation est ainsi, à la différence de l'incinération, consommatrice d'énergie.
- **Spallation** : ce terme désigne les réactions nucléaires dans lesquelles un proton de haute énergie ( $E \geq \text{GeV}$ ) casse un noyau cible. Plus qu'un mécanisme bien identifié la spallation a d'abord été un terme empirique lié à l'observation expérimentale de résidus de réaction correspondant à des pertes de masse allant de quelques nucléons à plusieurs dizaines de nucléons par rapport au noyau cible. Actuellement la spallation est comprise comme le résultat de deux étapes successives : i) une phase d'interaction directe, une cascade intranucléaire de collisions nucléons-nucléons lors de laquelle plusieurs nucléons sont éjectés et le reste du noyau chauffé, ii) une phase d'évaporation de particules, le refroidissement du noyau, lors de laquelle un grand nombre de neutrons peuvent être émis.

Les neutrons sont émis de façon préférentielle dans l'évaporation car ils n'ont pas de barrière coulombienne. Il peut ainsi y avoir plusieurs dizaines de neutrons émis pour seulement quelques particules chargées. Cette propriété a conduit à l'idée d'utiliser la

spallation pour construire une source de neutrons, par exemple pulsée pour certaines recherches, ou continue pour les systèmes hybrides. Avec cette technique chaque neutron "coûte" environ 30 MeV d'énergie de faisceau, c'est à dire qu'un proton de 900 MeV peut générer 30 neutrons. Avec un rendement de 50% pour l'accélérateur et de 33% pour le rendement thermique d'une centrale nucléaire qui fournit l'électricité, on voit que la production de chaque neutron de spallation a nécessité au départ environ l'énergie d'une fission (200 MeV). Au plan théorique ce mécanisme n'est encore qu'imparfaitement décrit comme il le sera exposé dans les cours qui suivent.

- **Surgénération, élimination des déchets et systèmes hybrides :** le point commun entre ces trois notions est l'apport ou l'utilisation de neutrons supplémentaires. Dans le bilan neutronique la surgénération prélève en moyenne un neutron par fission, l'élimination de certains déchets par capture de neutrons est également consommatrice. Dans le premier projet Rubbia de réacteur thermique au Thorium, les neutrons de spallation sont par exemple nécessaires pour soutenir le cycle de surgénération. En régime de neutrons rapides le rapport entre section efficace de fission et section efficace de capture devient plus grand et permet d'améliorer le bilan neutronique. L'intérêt d'un apport supplémentaire de neutrons de spallation est alors davantage de faciliter la stabilité d'opération du coeur puisqu'à intensité d'accélérateur nulle le réacteur d'un système hybride est sous critique et s'arrête de lui-même. Puisqu'un surgénérateur rapide est conçu pour minimiser l'importance des captures de neutrons on conçoit qu'il soit plus efficace pour l'incinération qu'un réacteur thermique de type REP. De même, utilisé en sous-génération, le bilan neutronique devient fortement excédentaire ce qui pourrait être utilisé pour transmuter des produits de fission. (cf. article du Monde).

MERCREDI 1<sup>er</sup> JANVIER 1992 / 124<sup>e</sup> ANNÉE / N° 1

ISSN 0373-0425

REPUBLIQUE FRANÇAISE

# JOURNAL OFFICIEL

## LOIS ET DECRETS

**LOI n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative  
aux recherches sur la gestion des déchets  
radioactifs (1)**

NOR : INDX3100071L

L'Assemblée nationale et le Sénat ont adopté,  
Le Président de la République promulgue la loi dont la  
teneur suit :

**Art. 1<sup>er</sup>.** - La gestion des déchets radioactifs à haute  
activité et à vie longue doit être assurée dans le respect de  
la protection de la nature, de l'environnement et de la  
santé, en prenant en considération les droits des généra-  
tions futures.

**Art. 2.** - Il est inséré, après l'article 3 de la loi n° 76-663  
du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la  
protection de l'environnement, un article 3-1 ainsi rédigé :

« **Art. 3-1.** - Le stockage souterrain en couches géolo-  
giques profondes de produits dangereux, de quelque nature  
qu'ils soient, est soumis à autorisation administrative. Cette  
autorisation ne peut être accordée ou prolongée que pour  
une durée limitée et peut en conséquence prévoir les condi-  
tions de réversibilité du stockage. Les produits doivent être  
retirés à l'expiration de l'autorisation.

« Les conditions et garanties selon lesquelles certaines  
autorisations peuvent être accordées ou prolongées pour  
une durée illimitée, par dérogation aux dispositions de  
l'alinéa précédent, seront définies dans une loi ultérieure. »

**Art. 3.** - Le stockage en France de déchets radioactifs  
importés, même si leur retraitement a été effectué sur le  
territoire national, est interdit au-delà des délais techniques  
imposés par le retraitement.

**Art. 4.** - Le Gouvernement adresse chaque année au  
Parlement un rapport faisant état de l'avancement des  
recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute  
activité et à vie longue et des travaux qui sont menés simul-  
tanément pour :

- la recherche de solutions permettant la séparation et la  
transmutation des éléments radioactifs à vie longue  
présents dans ces déchets ;
- l'étude des possibilités de stockage réversible ou irré-  
versible dans les formations géologiques profondes,  
notamment grâce à la réalisation de laboratoires sou-  
terrains ;
- l'étude de procédés de conditionnement et d'entrepo-  
sage de longue durée en surface de ces déchets.

Ce rapport fait également état des recherches et des réali-  
sations effectuées à l'étranger.

A l'issue d'une période qui ne pourra excéder quinze ans  
à compter de la promulgation de la présente loi, le Gouver-  
nement adressera au Parlement un rapport global d'évalua-  
tion de ces recherches accompagné d'un projet de loi auto-  
risant, le cas échéant, la création d'un centre de stockage  
des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue et  
fixant le régime des servitudes et des sujétions afférentes à  
ce centre.

etc...

(Articles 5 à 14 relatifs aux laboratoires souterrains.)

La présente loi sera exécutée comme loi de l'Etat.

Fait à Paris, le 30 décembre 1991.

FRANÇOIS MITTERRAND

Par le Président de la République :

Le Premier ministre,  
ÉDITH CRESSON

Le ministre d'Etat, ministre de l'économie,  
des finances et du budget,  
PIERRE BÉRÉGOVOY

Le ministre d'Etat, ministre de la fonction publique  
et de la modernisation de l'administration,  
JEAN-PIERRE SOISSON

Le ministre de la recherche et de la technologie,  
HUBERT CURIEN

Le ministre de l'environnement,  
BRICE LALONDE

Le ministre délégué au budget,  
MICHEL CHARASSE

Le ministre délégué à l'industrie et au commerce extérieur,  
DOMINIQUE STRAUSS-KAHN



## SCIENCES

Un rapport du ministre de la recherche et de l'espace

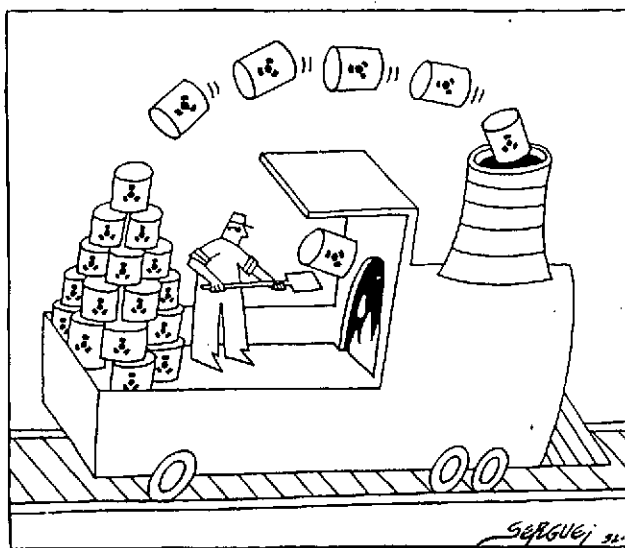
# Superphénix est indispensable aux études sur la gestion des déchets radioactifs, estime M. Hubert Curien

Le réacteur à neutrons rapides Superphénix et son pré-décesseur Phénix sont indispensables aux études visant à diminuer les stocks de plutonium et de certains déchets radioactifs issus des centrales nucléaires, estime M. Hubert Curien, dans un rapport remis récemment au premier ministre. Le ministre de la recherche et de l'espace propose la mise en place d'un « programme de recherches diversifié » sur la gestion des déchets radioactifs ouvert à toutes les solutions actuellement envisageables.

Après avoir décidé, le 29 juin, de geler pour plusieurs mois Superphénix, le surgénérateur contesté de Creys-Malville (Isère), M. Pierre Bérégovoy avait demandé à M. Hubert Curien de préparer « un rapport sur l'incinération des déchets et les conditions dans lesquelles Superphénix pourra y contribuer » (le Monde du 1<sup>er</sup> juillet). Dans le document qu'il vient de lui remettre, le ministre de la recherche et de l'espace conclut : « Il faut poursuivre les recherches techniques et l'évaluation économique concernant les réacteurs à neutrons rapides [comme Superphénix] qui apparaissent aujourd'hui comme la seule voie pour réduire efficacement le stock de plutonium et d'autres actinides. »

M. Curien tient, cependant, à préciser que ces propositions se situent dans le droit-fil de la loi du 30 décembre 1991, « qui édicte un moratoire de quinze ans avant tout stockage souterrain, prévoit un programme de recherche et développement à conduire pendant cette période ». S'il souligne les acquis du programme électronucléaire français, le ministre met aussi en exergue : « les difficultés et les incertitudes » qui concernent, en France comme ailleurs, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) et la gestion des « produits de fin de cycle » issus des combustibles irradiés.

Certains pays, comme les Etats-Unis et la Suède, ont décidé d'enfouir directement ces combustibles usés. C'est la solution la plus économique. Mais, estime le rapport, elle présente plusieurs inconvénients : stockage de volumes plus importants de produits hautement radioactifs et gaspillage de l'énergie encore exploitable de l'uranium et du plutonium enfouis avec les déchets.



La France et le Japon ont préféré le retraitement qui permet de récupérer les matières fissiles. Un seul réacteur à eau pressurisée (REP) du type de ceux qui équipent le parc électronucléaire français génère cha-

que année 21 tonnes de combustibles usés contenant 20 tonnes d'uranium enrichi à 0,9 %, réutilisable ; 260 tonnes de plutonium ; 21 kilos d'actinides mineurs (neptunium 237, américium, curium) et

750 kilos de produits de fission (césium 135, technétium 99, zirconium 93). Actinides mineurs et produits de fission, qui constituent les déchets hautement radioactifs à vie longue (plusieurs centaines de milliers d'années), sont vitrifiés pour un enfouissement profond ultérieur.

Reste le plutonium, « porteur de grands risques de prolifération ». Ses possesseurs se trouvent devant un dilemme, écrit M. Curien dans son rapport. Ou ils le considèrent comme un déchet et l'enfouissent, ou ils le brûlent. Sous forme de combustible MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) dans les REP, ou directement dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de type Superphénix, mais fonctionnant en « sous-générateurs ».

Imaginé au début des années 70 pour produire (en surgénérateurs) plus de plutonium qu'ils n'en consomment et représenter ainsi une source d'énergie inépuisable, les RNR ont perdu tout intérêt économique à court et moyen terme en raison de l'effondrement des cours de l'uranium. Cette nouvelle utilisation leur redonnerait un certain avenir. Selon le rapport Curien, la mise en œuvre d'un parc mixte de REP et de RNR incinérateurs (à raison d'un RNR pour 2 à 4 REP) pourrait permettre la stabilisation du stock de plutonium français à 300 tonnes environ, alors que nous en produisons actuellement quelque 13 tonnes par an. Les RNR permettraient aussi d'assurer la destruction d'une quantité notable d'actinides mineurs.

Cette solution n'est envisageable qu'au prix de quinze à vingt ans de recherche pour résoudre les nombreux problèmes techniques en suspens et d'une sérieuse évaluation technico-économique, souligne le rapport. Ces études, dans lesquelles Superphénix et Phénix, son pré-décesseur construit à Marcoule, joueraient un rôle central, doivent constituer l'un des axes des recherches, prévues par la loi du 30 décembre 1991, sur « l'aval du cycle », estime M. Curien. Les autres axes porteraient sur les sites de stockage, les procédés de retraitement poussé, l'optimisation des réacteurs actuels et futurs pour minimiser la radiotoxicité des produits de fin de cycle, et la « transmutation » des produits de fission en substance à « durée de vie » plus courte.

J.-P. D.

## Echéances

par Jean-Paul Dufour

Le rapport de M. Hubert Curien relance, en pleine période des fêtes, la procédure réglementaire pour un éventuel redémarrage de Superphénix. Sa publication devrait contribuer à rassurer les responsables de la NERSA et d'EDF, exploitants du surgénérateur de Creys-Malville (Isère), ainsi que les partenaires européens de la France engagés avec elle dans des recherches sur la filière des réacteurs à neutrons rapides. La décision du 29 juin de « geler » Superphénix leur avait fait craindre, en effet, un « enterrement » définitif sous la pression des écologistes.

« Une enquête publique sera menée dès que possible », précise aujourd'hui le premier ministre dans un communiqué (le Monde du 26 décembre). En pleine préparation des élections législatives de mars, donc. Les populations locales, majoritairement favorables au redémarrage pour des raisons

économiques, devraient y être sensibles. Les opposants vont, évidemment, faire campagne contre toute remise en marche. Mais comment contester une démarche qui se réclame de la « transparence » et s'appuie sur une loi votée l'an dernier au Parlement à une écrasante majorité, toutes tendances confondues ?

Le temps joue pour M. Bérégovoy. « Au vu du dossier de l'exploitant et des observations rassemblées pendant l'enquête publique, l'autorité de sûreté rendra un avis définitif sur le contenu des travaux nécessaires. La décision du gouvernement sera prise en fonction des conclusions de l'enquête publique et de l'avis de l'autorité de sûreté », rappelle le premier ministre dans son communiqué. Selon des experts, tout cela pourrait prendre « quelques mois ». Jusqu'en avril, par exemple.



US005160696A

**United States Patent** [19]  
**Bowman**

[11] Patent Number: **5,160,696**  
[45] Date of Patent: **Nov. 3, 1992**

- [54] **APPARATUS FOR NUCLEAR  
TRANSMUTATION AND POWER  
PRODUCTION USING AN INTENSE  
ACCELERATOR-GENERATED THERMAL  
NEUTRON FLUX**
- [75] Inventor: **Charles D. Bowman, Los Alamos, N. Mex.**
- [73] Assignee: **The United States of America as represented by the United States Department of Energy, Washington, D.C.**
- [21] Appl. No.: **560,900**
- [22] Filed: **Jul. 17, 1990**
- [51] Int. Cl.<sup>3</sup> ..... **G21G 1/02**
- [52] U.S. Cl. .... **376/189; 376/195; 376/170**
- [58] Field of Search ..... **376/189-195, 376/170-172, 156, 158, 354-360**

[56] **References Cited**

**U.S. PATENT DOCUMENTS**

- 3,216,901 11/1965 Teitel ..... 376/359  
3,325,371 6/1967 Stanton .  
3,349,001 10/1967 Stanton .  
3,453,175 7/1969 Hodge .  
3,778,627 12/1973 Carpenter .  
4,309,249 1/1982 Steinberg et al. .  
4,721,596 1/1988 Marriot et al. .... 376/189

**FOREIGN PATENT DOCUMENTS**

- 98600 4/1988 Japan ..... 376/158

**OTHER PUBLICATIONS**

- H. Takada et al., "A Conceptual Study of Actinide Transmutation System with Proton Accelerator," proceedings of the 2nd International Symposium held on Jan. 24-26, Mito, Ibaraki, Japan.  
Kazuo Furukawa et al., "Accelerator Molten-Salt Breeding and Thorium Fuel Cycle," proceedings of the 2nd International Symposium held on Jan. 24-26, Mito, Ibaraki, Japan.  
F. Atchison et al., "Status Report of the SIN Neutron

Source," proceedings of the International Collaboration on Advanced Neutron sources held on Sep. 13-16, 1983, Atomic Energy of Canada, Limited, Report AE-CL-8488.

"Preliminary Design and Neutronic Analysis of a Laser Fusion Driven Actinide Waste Burning Hybrid Reactor", Berwald et al., Nuclear Technology, vol. 42, Jan. 1979, pp. 34-50.

"Intense Neutron Sources", U.S. Atomic Energy Commission, COMF-660925, Sep. 1966, pp. 651-652.

*Primary Examiner*—Brooks H. Hunt

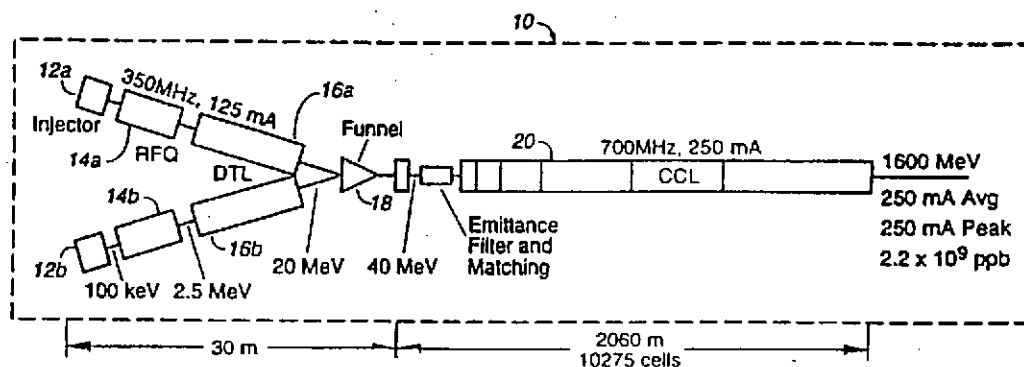
*Assistant Examiner*—Frederick H. Voss

*Attorney, Agent, or Firm*—Samuel M. Freund; Paul D. Gaetjens; William R. Moser

[57] **ABSTRACT**

Apparatus for nuclear transmutation and power production using an intense accelerator-generated thermal neutron flux. High thermal neutron fluxes generated from the action of a high power proton accelerator on a spallation target allows the efficient burn-up of higher actinide nuclear waste by a two-step process. Additionally, rapid burn-up of fission product waste for nuclides having small thermal neutron cross sections, and the practicality of small material inventories while achieving significant throughput derive from employment of such high fluxes. Several nuclear technology problems are addressed including 1. nuclear energy production without a waste stream requiring storage on a geological timescale, 2. the burn-up of defense and commercial nuclear waste, and 3. the production of defense nuclear material. The apparatus includes an accelerator, a target for neutron production surrounded by a blanket region for transmutation, a turbine for electric power production, and a chemical processing facility. In all applications, the accelerator power may be generated internally from fission and the waste produced thereby is transmuted internally so that waste management might not be required beyond the human lifespan.

60 Claims, 4 Drawing Sheets



RFQ Radio-Frequency Quadrupole

DTL Drift-Tube Linac

CCL Coupled-Cavity Linac



PCT

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION  
International Bureau

INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(51) International Patent Classification <sup>6</sup> : G21C 1/00, 1/30		(11) International Publication Number: WO 95/12203
A1		(43) International Publication Date: 4 May 1995 (04.05.95)
(21) International Application Number: PCT/EP94/02467 (22) International Filing Date: 25 July 1994 (25.07.94) (30) Priority Data: 93117587.1 29 October 1993 (29.10.93) EP (34) Countries for which the regional or international application was filed: AT et al. (71)(72) Applicant and Inventor: RUBBIA, Carlo [IT/CH]; 9, chemin des Tulipiers, CH-1200 Genève (CH). (74) Agent: LOISEL, Bertrand; Cabinet Plasseraud, 84, rue d'Amsterdam, F-75440 Paris Cédex 09 (FR).		(81) Designated States: AM, AT, AU, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CZ, DE, DK, ES, FI, GB, GE, HU, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LK, LT, LU, LV, MD, MG, MN, MW, NL, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SI, SK, TJ, TT, UA, US, UZ, VN, European patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), OAPI patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, NE, SN, TD, TG), ARIPO patent (KE, MW, SD). Published With international search report.

(54) Title: AN ENERGY AMPLIFIER FOR "CLEAN" NUCLEAR ENERGY PRODUCTION DRIVEN BY A PARTICLE BEAM ACCELERATOR

(57) Abstract

The method is for producing energy from a nuclear fuel material contained in an enclosure, through a process of breeding of a fissile element from a fertile element of the fuel material via a  $\beta$ -precursor of said fissile element and fission of the fissile element. A high energy particle beam is directed into the enclosure for interacting with heavy nuclei contained in the enclosure so as to produce high energy neutrons. The neutrons thereby produced are multiplied in sub-critical conditions by the breeding and fission process. Said breeding and fission process is carried out inside the enclosure.

